

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นอุตสาหกรรม ในงานดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดง

ณัฐนันท์ มุลสระคู¹ พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์² และ วารุณี เปรมมานนท์³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการใช้สารหล่อลื่นอุตสาหกรรมในงานดิ่งขึ้นรูปท่อทองแดง วิธีการที่ใช้ในกระบวนการดิ่งท่อคือวิธีการดิ่งแบบโพลตึงปลึก วัสดุทำด้ายและปลึกคือทังสเตนคาร์ไบด์ มุมไหลเข้าแม่พิมพ์เท่ากับ 26 องศา และมุมปลึกเท่ากับ 22 องศา ท่อทองแดงใช้ตามมาตรฐาน JIS H3300 C1220 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกท่อก่อนดิ่งเท่ากับ 22.24 มม. ความหนาท่อก่อนดิ่งเท่ากับ 1.14 มม. อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับร้อยละ 38 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลแยกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือกลุ่มสารหล่อลื่นที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมดิ่งท่อและอุตสาหกรรมทั่วไปจำนวน 4 ชนิด และกลุ่มที่สองคือกลุ่มสารหล่อลื่นพื้นฐานที่มีความหนืดต่างกันจำนวน 4 ชนิด การทดสอบเพื่อตรวจสอบสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้นั้นจะพิจารณาจากแรงที่ใช้ในการดิ่งท่อที่ลดลงและความเรียบผิวท่อสำเร็จที่ดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ความเรียบผิวของท่อและแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ ค่าความหนืดของสารหล่อลื่น ส่วนปัจจัยรองคือสารรับแรงกดซึ่งในที่นี้หมายถึงกำมะถันและฟอสฟอรัส โดยสารหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยจะทำให้ผิวท่อมีความเรียบมาก แต่ต้องไม่น้อยเกินไปจนอาจทำให้ท่อขึ้นรูปไม่สำเร็จได้ และสารหล่อลื่นที่มีความหนืดมากหรือน้อยเกินไปจะทำให้แรงเสียดทานมากส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดิ่งมากขึ้น

คำสำคัญ : การดิ่งท่อ / สารหล่อลื่น / ความหนืด / สารเพิ่มคุณภาพ / ความเรียบผิว

¹ นักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

Comparative Study on the use of Industrial Lubricants for Copper Tube Drawing

Nutthanun Moolsradoo¹, Pongpan Kaewtatip², and Varunee Premanond³
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

The aim of this research is to comparative study on the use of industrial lubricants for copper tube drawing process. Tube drawing operations are carried out using the floating-plug method. Both die and plug materials are tungsten carbide. The die angle and plug angle are 26° and 22°, respectively. The tube material for this experiment is copper tube (JIS) H3300 C1220. The outer diameter of the tube before drawing is 22.24 millimeters having 1.14 millimeters thickness. The reduction ratio of the cross sectional area is set to be constant at 38 percent. Two groups of lubricating oil are experimented. First group, four types of commercial oil which is commonly used in tube drawing and forming industry are selected. Second group, four types of mineral base oil having different viscosity are tested. The performance of each lubricant is evaluated by the ability to decrease maximum drawing load and to provide better quality of tube wall surface. The results show that tube surface roughness depended on lubricant viscosity. The lower the viscosity of lubricant, the better is the surface quality.

Keywords : Tube Drawing / Lubricant / Viscosity / Additives / Surface Roughness

¹ *Researcher, Faculty of Engineering.*

² *Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering.*

³ *Associate Professor, Department of Tool and Materials Engineering.*

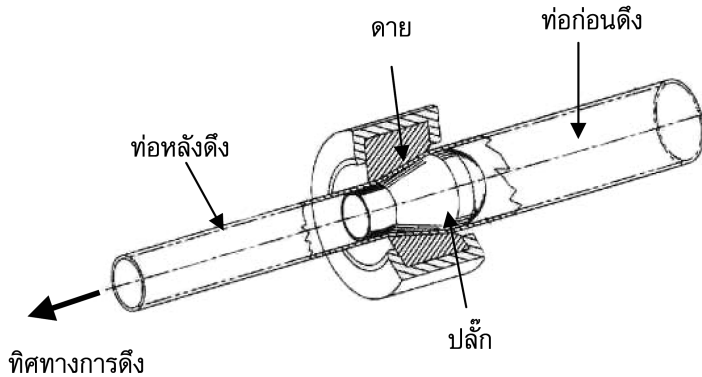
1. บทนำ

กระบวนการดึงท่อ (Tube drawing) เป็นกระบวนการขึ้นรูปท่อกระบวนการหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตท่อ ทั้งนี้เพื่อที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ท่อทองแดงในอุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ซึ่งถือว่าการเติบโตอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ซึ่งในกรรมวิธีการดึงท่อนั้นจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ดึงท่อ (Drawing die) และสารหล่อลื่น (Lubricants) ที่เหมาะสม จึงจะทำให้ผิวท่อที่ได้มีคุณภาพทั้งด้านนอกและด้านใน และตัวท่อไม่เกิดความเสียหายขณะทำการดึง กรรมวิธีการดึงท่อนั้นเป็นการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งด้านนอกและด้านในท่อโดยการให้แรงดึงกับท่อซึ่งจะถูกดึงผ่านแม่พิมพ์ ทำให้เกิดความเค้นสูงกับท่อจนอาจเกิดความเสียหาย เช่น ท่อเกิดการขาดในขณะทำการดึงหรือเกิดการรอยขีดข่วนที่ผิวท่อ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผิวท่อทั้งด้านนอกและด้านใน ทำให้ต้องเลือกแม่พิมพ์ดึงท่อและสารหล่อลื่นที่มีความเหมาะสม และจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับกระบวนการดึงท่อ มีทั้งในส่วนของ การทดลองจริงและการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดึงท่อ [1-2] ในงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารหล่อลื่นในกระบวนการดึงท่อยังมีอยู่น้อยมาก เช่น งานวิจัยของ Michael [3] ซึ่งได้ทำการศึกษเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการดึงลวด โดยมีการใช้สารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน ถึงแม้งานวิจัยนี้จะไม่ใช้การดึงท่อโดยตรงแต่การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งงานดังกล่าวเน้นศึกษาสารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง เช่น แกรไฟต์ (Graphite) และโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ทำให้ผลที่ได้ไม่มีความหลากหลายในส่วนของ การเปรียบเทียบผลของการใช้สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลว ส่วน Bech [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลตัว

ของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปอะลูมิเนียมแผ่น ซึ่งเป็นการศึกษาที่เน้นลักษณะการไหลตัวของสารหล่อลื่นเท่านั้น ไม่สามารถบ่งบอกคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้งานมีคุณภาพที่ดีได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาเพื่อให้ได้คุณสมบัติเฉพาะของสารหล่อลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้งานที่แรงที่ใช้ในการดึงท่อน้อยลงและผิวท่อหลังการดึงขึ้นรูปเรียบเงาไม่มีรอยขีดข่วน ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดและปริมาณสารเพิ่มคุณภาพที่แตกต่างกัน โดยเลือกสารหล่อลื่นที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปท่อ สารหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป และสารหล่อลื่นพื้นฐานที่ยังไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติให้ดีขึ้น รวมทั้งหมด 8 ชนิด ส่วนท่อที่ใช้ในการทดลองคือท่อทองแดงเกรด (JIS) H3300 C1220 ซึ่งเป็นท่อที่มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ฯลฯ วิธีการดึงท่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วิธีฟลอยด์ปลั๊ก (Floating Plug) ซึ่งเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมการดึงท่อที่มีความยาวมากๆ

2. กระบวนการดึงท่อ

หลักการทั่วไปของการดึงท่อ ดึงลวด และเหล็กท่อนกลมจะคล้ายกัน แต่จะแตกต่างกันออกไปตามขนาดและรูปร่างของงานหลังกระบวนการเสร็จสิ้น ในกระบวนการดึงท่อจะเริ่มจากการนำท่อขนาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการอื่นมาก่อนหน้านี้ นำมาทำการดึงเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกและด้านในของท่อ โดยการดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงท่อ ซึ่งประกอบด้วยตาย (Die) และปลั๊ก (Plug) ที่ทำหน้าที่ควบคุมขนาดและคุณภาพผิวท่อด้านนอกและด้านในตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การดึงท่อผ่านแม่พิมพ์ [5]

ขั้นตอนการดึงท่อจะเริ่มจากการให้แรงดึงที่ปลายท่อ ด้านหนึ่ง ซึ่งปลายท่อด้านที่จะถูกดึงจะถูกบีบให้มีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะสอดผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ดึงท่อ หลังจากมีการทาสารหล่อลื่นที่ท่อเรียบร้อยแล้วท่อจะถูกดึงด้วยเครื่องดึงท่อดรอปเบนซ์ (Draw Bench) หลังกระบวนการเสร็จสิ้นขนาดและรูปร่างภายนอกท่อจะเท่ากับขนาดรูในของตาย ส่วนขนาดและรูปร่างภายในท่อจะถูกกำหนดด้วยแท่งแกนหรือปลั๊ก

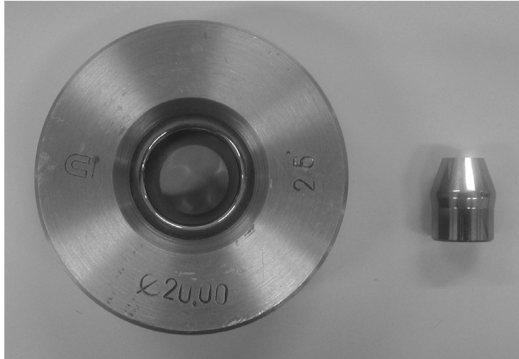
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สาร

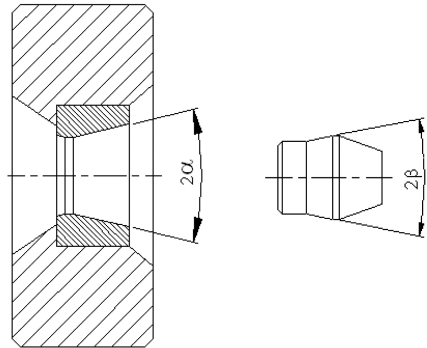
หล่อลื่นที่มีผลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง โดยจะประเมินผลจากแรงที่ใช้ในการดึงท่อและความเรียบผิวของท่อหลังการดึงทั้งด้านนอกและด้านใน ซึ่งรายละเอียดของท่อทองแดงและแม่พิมพ์ดึงท่อแสดงดังตารางที่ 1 และก่อนทำการดึงท่อได้ทำการตรวจสอบวัดความเรียบผิวและตรวจสอบขนาดมิติของแม่พิมพ์ดึงท่อ (รูปที่ 2) ด้วยเครื่องวัดความเรียบผิว (Surface roughness measuring device) และเครื่องวัดขนาดโปรไฟล์โปรเจคเตอร์ (Profile projector) ตามลำดับ เพื่อยืนยันว่าอยู่ในระดับที่ได้กำหนดไว้ ส่วนท่อได้ทำการตรวจสอบวัดขนาดและความเรียบผิวทั้งด้านในและนอกก่อนทำการดึงเช่นกัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของท่อทองแดงและแม่พิมพ์ดึงท่อ

รายละเอียด	ท่อทองแดง	แม่พิมพ์ดึงท่อ
ชนิดของวัสดุ	ทองแดง (JIS) H3300 C1220	ทังสเตนคาร์ไบด์ (K30)
ขนาด	\varnothing นอกท่อก่อนดึง = 22.24, หนา = 1.14 มม. \varnothing นอกท่อหลังดึง = 19.96, หนา = 0.77 มม. ความยาวท่อก่อนดึง = 1 ม.	$2\alpha \approx 26$ องศา [6] $2\beta \approx 22$ องศา [7] แสดงดังรูปที่ 2
ความเร็วในการทำงาน	160 มม./วินาที	



(ก) รูปร่างของตายและปลั๊ก



(ข) มุมไหลเข้าของตายและปลั๊ก

รูปที่ 2 แม่พิมพ์ดิ่งท่อ

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 8 ชนิด โดยแยกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือกลุ่มสารหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมดึงท่อและอุตสาหกรรมทั่วไป (Tube drawing and forming oil) จำนวน 4 ชนิด (A-D) กลุ่มที่สองคือ

กลุ่มสารหล่อลื่นพื้นฐาน (Based oil) ซึ่งยังไม่ได้เติมสารเพิ่มคุณภาพใด แต่มีค่าความหนืดแตกต่างกัน จำนวน 4 ชนิด (E-H) โดยที่สารหล่อลื่นทั้ง 8 ชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองแต่ละชนิด

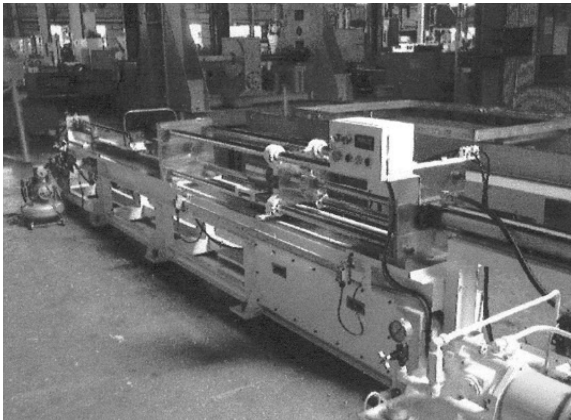
ชนิดของสารหล่อลื่น		คุณสมบัติ	Flash Point (°ซ)	ความหนืด ที่ 40 °ซ (cSt)	ความหนืด ที่ 100 °ซ (cSt)
Tube drawing and forming oil	A		180	270.00	23.90
	B (Coconut oil)		216	35.60	7.39
	C		188	901.40	55.20
	D (Rust proof oil)		53	3.50	*
Based oil	E		170	10.50	2.74
	F		204	29.89	5.20
	G		267	99.08	11.07
	H		305	497.60	32.40

หมายเหตุ * ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°ซ เกินจุดวาบไฟของสารหล่อลื่น D

ในกระบวนการดึงท่อจะใช้เครื่องดึงท่อดรอปเบนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีขนาดแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 5 ตัน และความเร็วในการดึงสูงสุดเท่ากับ 160 มม./วินาที ก่อนการดึงท่อจะทำการใส่ปลั๊กเข้าไปข้างในท่อ ก่อนแล้วจึงเทสารหล่อลื่นเข้าไปข้างในท่อในปริมาณที่เท่ากัน ทุกการทดลองคือ 0.2 ล. ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอ สำหรับการ

หล่อลื่นภายในท่อขณะทำการดึง จากนั้นจึงสอดปลายท่อด้านที่ถูกบีบให้มีขนาดเล็กกลงเข้าไปในแม่พิมพ์ดิ่งท่อโดยปลายท่อด้านนี้จะถูกจับยึดด้วยตัวจับยึด (Gripper) ซึ่งติดอยู่กับเครื่องดึงท่อดรอปเบนซ์ จากนั้นจึงทาสารหล่อลื่นที่ผิวนอกของท่อตลอดความยาว พร้อมทั้งมีการฉีดสารหล่อลื่นใส่บริเวณปากตายที่ท่อไหลเข้าตลอดเวลาที่ทำการ

ดิ่งท่อ เมื่อเตรียมพร้อมเสร็จแล้วจึงเริ่มทำการดิ่งท่อหลังกระบวนการเสร็จสิ้นขนาดและรูปร่างภายนอกของท่อจะถูกกำหนดโดยขนาดรูในของตาย ส่วนขนาดและรูปร่างภายในของท่อจะถูกกำหนดด้วยขนาดของปลັก ในส่วนของผลการวิจัยสามารถแยกได้เป็น 3 ส่วนคือ การทดสอบหาปริมาณสารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่น การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่น และการทดลองที่เกี่ยวกับการดิ่งท่อซึ่งมีรายละเอียดทั้งหมด ดังนี้



รูปที่ 3 เครื่องดิ่งท่อดรอปเบนท์

- การทดสอบหาปริมาณสารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่นคือ ฟอสฟอรัส (Phosphorus) สังกะสี (Zinc) แมกนีเซียม (Magnesium) และแคลเซียม (Calcium) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4951 [8] ส่วนสารเพิ่มคุณภาพกำมะถัน (Sulphur) ใช้มาตรฐาน ASTM D4294 [9]

- การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่น ด้วยวิธีบอลบนแผ่นจานหมุน (Ball on disk) โดย

ใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) ทดลองตามมาตรฐาน ASTM G99-95a [10] กำหนดให้บอลแทนแม่พิมพ์ทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ชนิดเดียวกับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการดิ่งท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. และแผ่นจานหมุนทำจากวัสดุทองแดงชนิดเดียวกับท่อที่ใช้ในการทดลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มม.หนา 5 มม. ระยะทางในแนวเส้นตรงที่ทำการทดสอบที่กำหนดคือ 300 ม. การเปรียบเทียบสภาวะการทำงานจริงกับการทดสอบแบบบอลบนจานหมุนแสดงดังตารางที่ 3

- ในการทดลองดิ่งท่อนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้ทางสถิติภายใต้ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 จึงกำหนดให้ทำการทดลองจำนวนซ้ำ 9 ครั้งในแต่ละสารหล่อลื่น หลังการดิ่งท่อด้วยเงื่อนไขต่างๆ ที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้เสร็จสิ้น ค่าที่บันทึกผลขณะทำการทดลองและหลังการทดลองมีดังนี้

1. บันทึกอุณหภูมิที่ผิวนอกของท่อ โดยทำการวัดอุณหภูมิบริเวณปลายท่อทันทีที่ปลายท่อถูกดึงผ่านตายและปลັก โดยการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) แบบสัมผัส
2. บันทึกแรงที่ใช้ในการดิ่งท่อทองแดงโดยใช้ Loadcell แบบวงแหวน
3. บันทึกค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (R_a) ของผิวท่อหลังการดึงทั้งด้านนอกและด้านใน ซึ่งค่าความเรียบผิวเฉลี่ยเป็นความสูงเฉลี่ยจากเส้นกึ่งกลางของรอยสูงต่ำทั้งหมดของผิวท่อ
4. บันทึกค่าความแข็งจุลภาคบริเวณพื้นที่หน้าตัดของท่อ (Microhardness)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสภาวะการทำงานจริงกับการทดสอบแบบอบบนจานหมุน

สภาวะเงื่อนไข	สภาวะการทำงานจริง	การทดสอบอบบนจานหมุน
ความเร็วในการทำงาน (มม./วินาที)	160	
อุณหภูมิการทำงาน (°ซ)	อุณหภูมิห้อง (26-27 °ซ)	
สารหล่อลื่นที่ใช้	8 ชนิด (ตารางที่ 2)	
น้ำหนักกด (นิวตัน)	-	10
อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (ร้อยละ)	38	-
ความดันที่ตำแหน่งสัมผัส (MPa*)	1,421	1,177

หมายเหตุ * ผลได้มาจากการทดสอบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM 2D V7.1 ซึ่งเงื่อนไขต่างๆ เหมือนกับการทดลองดึงท้อจริง คุณสมบัติของวัสดุท้อได้จากการทดสอบจริงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ค่าจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง (True stress) และความเครียดจริง (True strain) $\sigma_t = K \epsilon_t^n$ ค่าที่ได้คือค่า $K=523.59$ MPa และค่า $n=0.0295$

**ผลได้มาจากการคำนวณของเครื่องไดรอมิเตอร์ตามกฎของ Hertzian Equation [11]

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

หล่อลื่นเพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นแต่ละชนิดนั้น แสดงได้ดังตารางที่ 4

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของสารหล่อลื่น

การทดสอบหาปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพในสาร

ตารางที่ 4 ปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

สารเพิ่มคุณภาพ ชนิดของสารหล่อลื่น	ฟอสฟอรัส (ppm.wt.)	กำมะถัน (%wt.)	สังกะสี (ppm.wt.)	แมกนีเซียม (ppm.wt.)	แคลเซียม (ppm.wt.)
A	-	0.82	-	-	2.01
B	-	-	-	3.68	9.11
C	-	-	-	-	-
D	391.60	0.30	-	6.00	15.43
E	-	0.21	-	-	-
F	-	0.19	-	-	-
G	*	0.37	-	-	-
H	-	0.62	-	-	-

หมายเหตุ - ไม่พบสารเพิ่มคุณภาพชนิดนั้นในสารหล่อลื่น

* พบสารเพิ่มคุณภาพชนิดนั้นในปริมาณน้อยมาก (<5 ppm.wt.)

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่ามีการทดสอบหาปริมาณสารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่นเพื่อนำมาช่วยวิเคราะห์ผลการทดลองจำนวน 5 ชนิด ได้แก่สารเพิ่มคุณภาพกำมะถันและฟอสฟอรัสซึ่งเป็นสารรับแรงกด (Extreme Pressure; EP) ที่มีคุณสมบัติสำคัญคือลดแรงเสียดทานภายใต้สภาวะความดันสูงและเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดสูง ส่วนสารเพิ่มคุณภาพสังกะสี แมกนีเซียม และแคลเซียม มีคุณสมบัติในด้านชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิว [12]

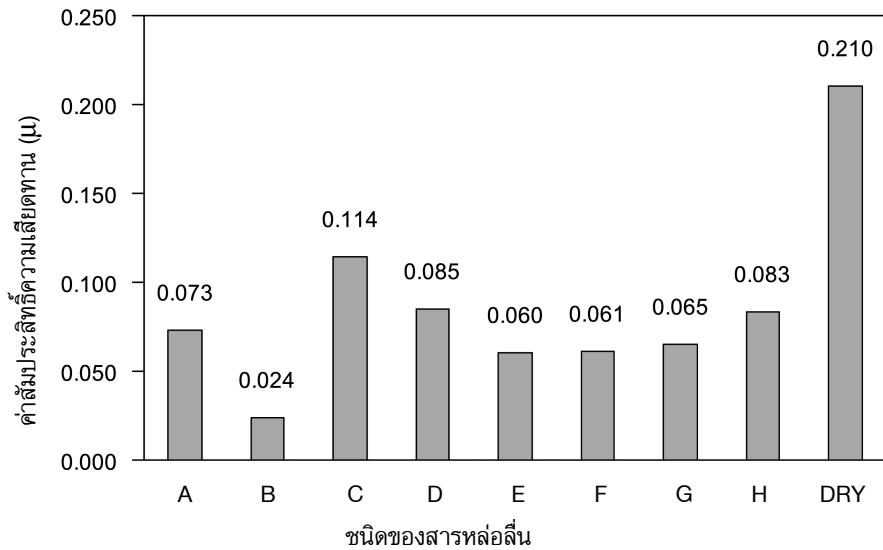
จากผลการทดสอบเฉพาะในส่วนของปริมาณสารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่นแต่ละชนิด ดังตารางที่ 4 ในกลุ่มที่ 1 กลุ่มสารหล่อลื่นที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมดิ่งท่อและอุตสาหกรรมทั่วไป จะเห็นว่าสารหล่อลื่น D น่าจะเป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติโดยรวมดีที่สุด เนื่องจากมีส่วนผสมของสารเพิ่มคุณภาพเกือบจะทุกชนิด ส่วนสารหล่อลื่น C น่าจะเป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติโดยรวมด้อยที่สุดของกลุ่มนี้ เนื่องจากเป็นสารหล่อลื่นที่ไม่พบสารเพิ่มคุณภาพทั้ง 5 ตัวเป็นส่วนผสม เมื่อทำการวิเคราะห์สารเพิ่มคุณภาพในแต่ละสารหล่อลื่นของกลุ่มนี้จะพบว่า สารหล่อลื่น A น่าจะมีคุณสมบัติเด่นในด้านลดแรงเสียดทานภายใต้สภาวะความดันสูง และเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดสูงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นอีกสามชนิด เนื่องจากสารหล่อลื่นชนิดนี้มีสารเพิ่มคุณภาพกำมะถันซึ่งเป็นสารรับแรงกดในปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 0.82 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าสารเพิ่มคุณภาพฟอสฟอรัสจะเป็นสารรับแรงกดเช่นเดียวกันกับสารเพิ่มคุณภาพกำมะถัน แต่เนื่องจากสารเพิ่ม

คุณภาพกำมะถันให้ประสิทธิภาพในการรับแรงกดดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารเพิ่มคุณภาพตัวอื่น [13]

ในกลุ่มที่ 2 กลุ่มสารหล่อลื่นพื้นฐาน จะเห็นว่าสารหล่อลื่น H น่าจะเป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติดีที่สุดเนื่องจากมีสารเพิ่มคุณภาพกำมะถันเป็นส่วนผสมในปริมาณมากที่สุด สารหล่อลื่นที่น่าจะมีคุณสมบัติโดยรวมรองลงมาคือสารหล่อลื่น G, E และสารหล่อลื่น F ตามลำดับ เนื่องจากมีสารเพิ่มคุณภาพกำมะถันเป็นส่วนผสมในปริมาณรองลงมา

4.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

ในการศึกษาพฤติกรรมของความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะทำการดิ่งขึ้นรูป โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Ball on disk ด้วยเครื่องไดรบบอมิเตอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคืออุณหภูมิห้อง (26-27 °ซ) ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งจะพบว่า การทดสอบโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น (Dry condition) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุดคือ 0.21 เนื่องจากสภาวะนี้เกิดการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างบอลและจานหมุน ทำให้เกิดการยึดติด (Adhesion) สูง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์จึงต้องใช้แรงที่มากพอในการเอาชนะแรงยึดติดแยกสองผิวออกจากกัน [14] และเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองในกรณีที่มีการใช้สารหล่อลื่นอีก 8 ชนิด จะพบว่าเมื่อมีการใช้สารหล่อลื่นทดลองทุกชนิดจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำลง เนื่องจากสารหล่อลื่นช่วยทำให้เกิดฟิล์มป้องกันการสัมผัสระหว่างผิวสัมผัสของบอลและจานหมุน



ความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °ซ	270	35.60	901.40	3.50	10.50	29.89	99.08	497.60	-
ความหนืดที่อุณหภูมิ 100 °ซ	23.9	7.39	55.2	-	2.74	5.20	11.07	32.40	-

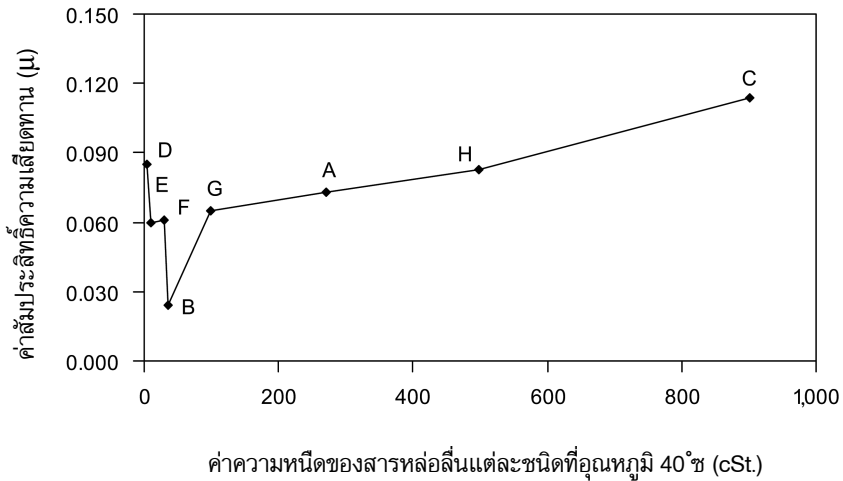
รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

เมื่อนำผลดังกล่าวมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่นจะได้ดังรูปที่ 5 โดยจะพบว่าเมื่อสารหล่อลื่นมีค่าความหนืดมากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มสูงตามไปด้วย และมีช่วงของค่าความหนืดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ซึ่งสารหล่อลื่นที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำที่สุดคือสารหล่อลื่น B และจะเห็นได้ว่าช่วงค่าความหนืด (ที่อุณหภูมิ 40 °ซ) ของสารหล่อลื่นที่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าค่อนข้างต่ำคือตั้งแต่ 10 - 100 cSt โดยประมาณ และจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าประมาณ 0.06 หรือน้อยกว่า ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารเพิ่มคุณภาพที่เติมลงในสารหล่อลื่นจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้น้อยกว่าความหนืด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการทดสอบแบบ Ball on disk เป็นการทดสอบในอ่างสารหล่อลื่นที่มีปริมาณสารหล่อลื่นท่วมบริเวณที่เกิดการสัมผัสกันของบอลและจานหมุนตลอดเวลา นอกจากนั้นพื้นที่สัมผัสของบอลและจานหมุนก็มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับพื้นที่สัมผัสจริงของแม่พิมพ์

และชิ้นงานในกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะ ดังนั้นถึงแม้ความดันที่ตำแหน่งสัมผัสในการทดสอบแบบ Ball on disk จะไม่แตกต่างจากในกรรมวิธีดึงท่อจริงมากก็ตาม แต่สารหล่อลื่นจะสามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างผิวบอลกับจานหมุนได้ดีกว่าที่ในกรณีของการดึงท่อจริง ทำให้อิทธิพลของสารรับแรงกดในกรณีของการทดสอบแบบ Ball on disk ไม่ชัดเจนมากนัก อย่างไรก็ตาม ถ้าสารหล่อลื่นมีความหนืดมากเกินไป จะทำให้โอกาสในการแทรกตัวเข้าไปที่หน้าสัมผัสระหว่างบอลและจานหมุนเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้นกว่า 100 cSt ในทำนองกลับกันกรณีที่สารหล่อลื่นมีค่าความหนืดน้อยเกินไป คือน้อยกว่า 10 cSt (ที่อุณหภูมิ 40 °ซ) ทำให้สารหล่อลื่นขาดความสามารถในการคงสภาพฟิล์มกั้นระหว่างผิวสัมผัส จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณากรณีความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100 °ซ จะพบว่าสารหล่อลื่น B D E และ F ซึ่งล้วนแต่มีค่าความหนืดน้อยกว่า 10 cSt จึงน่าจะทำให้สารหล่อลื่นขาดความสามารถในการคงสภาพฟิล์มกั้นระหว่าง

ผิวสัมผัส ส่วนสารหล่อลื่นที่เหลืออีก 4 ชนิดซึ่งมีค่าความหนืดไม่เกิน 100 cSt น่าจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียด

ทานมีค่าค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกับกรณีค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 40 °ซ



รูปที่ 5 อิทธิพลความหนืดของสารหล่อลื่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

4.3 ผลการศึกษาการดิ่งท่อทองแดง

จากการทดลองดิ่งท่อทองแดงโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดและปริมาณสารเพิ่มคุณภาพแตกต่างกัน จะพบว่าชนิดของสารหล่อลื่นส่งผลต่อสภาวะการดิ่งท่อค่อนข้าง

มาก โดยที่การใช้สารหล่อลื่น A B C G และ H ทำให้สามารถดิ่งขึ้นรูปท่อได้สำเร็จ ในขณะที่การใช้สารหล่อลื่น D E และ F ไม่สามารถดิ่งท่อให้สำเร็จได้ โดยจะทำให้ท่อขาดขณะดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 6



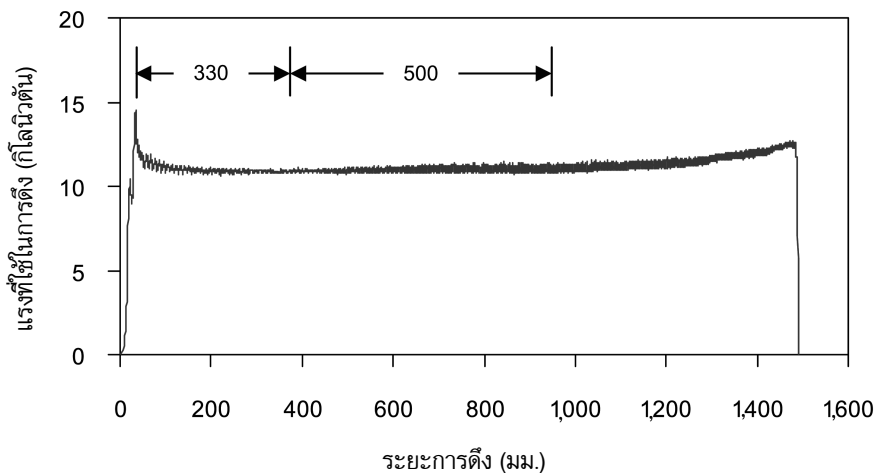
- ← ท่อก่อนดิ่งขึ้นรูป
∅ นอกท่อ 22.24 มม.
- ← ท่อที่ขึ้นรูปสำเร็จ
∅ นอกท่อ 19.96 มม.
- ← ท่อที่ขึ้นรูปไม่สำเร็จ

รูปที่ 6 ตัวอย่างของท่อทองแดงที่ใช้ในการทดลอง

4.3.1 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดึง

ตัวอย่างแรงในการดึงขึ้นรูปท่อสำเร็จโดยใช้สารหล่อลื่น A แสดงในรูปที่ 7 (สารหล่อลื่นชนิดอื่น มีลักษณะของกราฟคล้ายกับรูปที่ 7 เช่นกัน) ซึ่งระยะการดึงท่อทั้งหมดเมื่อความยาวท่อก่อนดึง 1 ม. (รวมบริเวณปลายท่อที่ถูกบีบให้เล็กลง) คือประมาณ 1,500 มม. ส่วนระยะที่นำมาพิจารณาแรงในการดึงท่อ คือระยะ 500 มม. ซึ่งเริ่มวัดจากตำแหน่งแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงสุดแล้ววัดระยะออกมา 330 มม. จากนั้น

แรงดึงในช่วง 500 มม. ต่อมา ซึ่งเป็นระยะที่แรงดึงมีแนวโน้มคงที่มากที่สุดในทุกสารหล่อลื่น นำมาทำการหาค่าเฉลี่ยแรงในการดึงท่อของสารหล่อลื่นนั้นๆ และจากรูปจะเห็นว่าช่วงแรกแรงเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่าหนึ่ง เนื่องจากท่อเริ่มถูกดึงเข้ามาในแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วทำให้เกิดการกระแทกขึ้นหลังจากช่วงนี้แล้วพบว่าแรงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของกราฟ เนื่องจากปลายท่อเกิดการงอเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการไหลตัวของเนื้อวัสดุไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้แรงดึงในช่วงปลายท่อเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



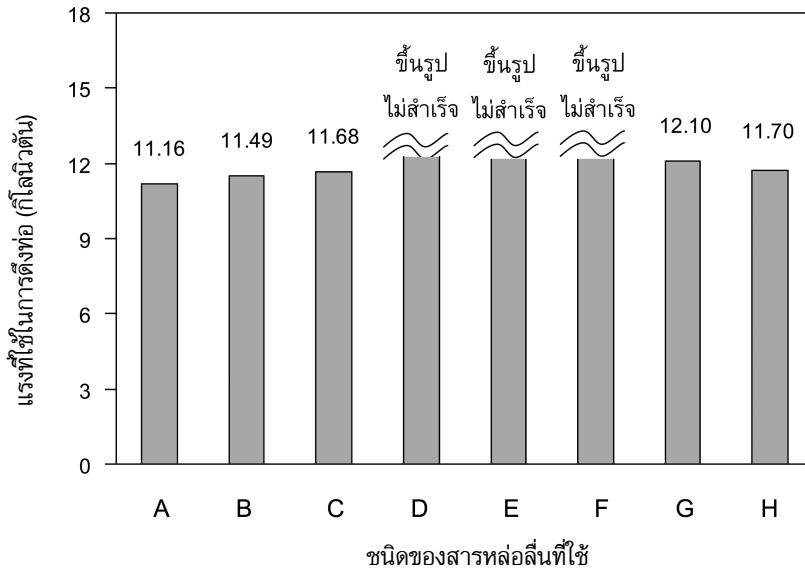
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อกับระยะในการดึง

ผลการวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 8 นอกจากนั้นยังได้วัดอุณหภูมิผิวท่อตรงจุดปลายของท่อทันทีเมื่อท่อถูกดึงผ่านปลັ๊กและตายแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งในการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดสัมผัส ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ทำการวัดได้ขณะทำการดึงท่อโดยใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิดมีค่าค่อนข้างสูงแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก และพบว่าสารหล่อลื่นชนิด D E และ F ทำให้ดึงขึ้นรูปท่อไม่สำเร็จ เนื่องจากสารหล่อลื่นทั้งสามชนิดมีค่าความหนืดต่ำมากที่อุณหภูมิสูง ดังตารางที่ 2 ทำให้ไม่สามารถรักษาสภาพฟิล์มกันระหว่างผิวคู่สัมผัสระหว่างท่อกับตายและปลັ๊กในขณะที่ทำการดึงไว้ได้จึงส่งผลให้ท่อขาด พิจารณาสารหล่อลื่นที่เหลือ

อีก 5 ชนิดจะพบว่าทำให้สามารถดึงขึ้นรูปท่อได้สำเร็จ ซึ่งแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 7 ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนชนิดสารหล่อลื่น จะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวท่อและผิวแม่พิมพ์ขณะทำการดึงขึ้นรูปเท่านั้น ในขณะที่แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อจะประกอบไปด้วยสามส่วน คือ แรงที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป (Ideal plastic deformation force) แรงที่ใช้ในการเอาชนะการเฉือน (Shear redundant: Macro shearing and unshearing) และแรงที่ใช้ในการเอาชนะแรงเสียดทาน (Friction force) [7] ค่าสัมประสิทธิ์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนสารหล่อลื่นจะส่งผลต่อแรง

ในส่วนสุดท้ายหรือส่วนของแรงเสียดทานเท่านั้น ซึ่งถือเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสองส่วนแรก จึงทำให้แรงที่ใช้ในการตั้งขึ้นรูปรวมที่วัดได้ไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม มีแนวโน้มว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยสาร

หล่อลื่น A จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสารหล่อลื่นชนิดอื่น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารรับแรงกดก่ามะถันที่มีปริมาณมากที่สุดในสารหล่อลื่น A นั้นเอง



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดึงท่อ

ตารางที่ 5 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนผิวท่อ (บริเวณปลายท่อ)

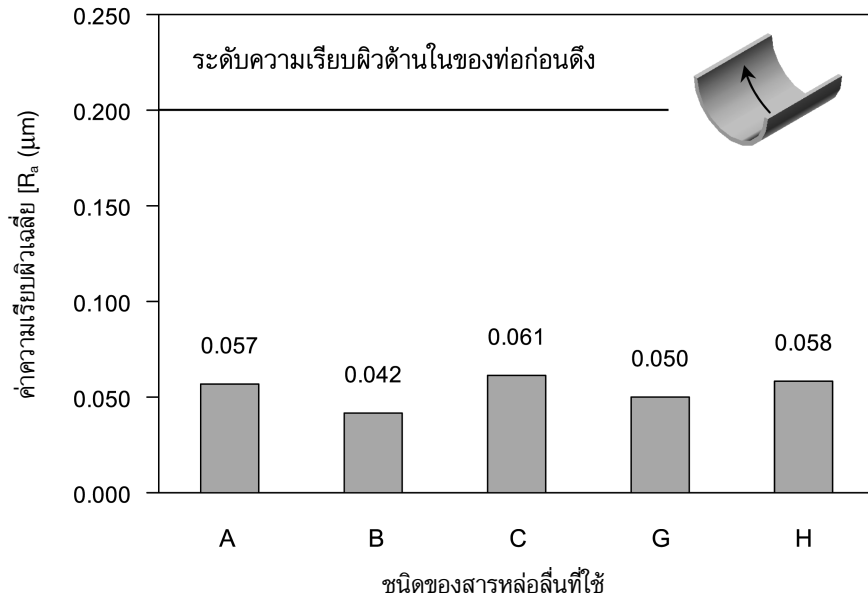
อุณหภูมิ (°ซ)	ชนิดของสารหล่อลื่น							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	86.6	89.1	82.7	-	-	-	85.0	86.0

หมายเหตุ - ดึงขึ้นรูปท่อไม่สำเร็จจึงไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่ปลายท่อได้

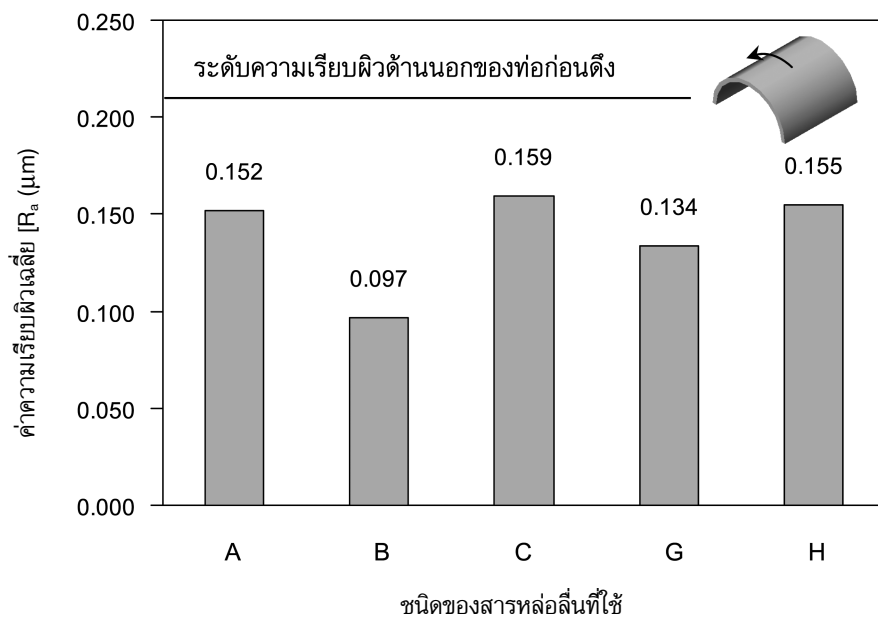
4.3.2 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของผิวท่อ

ค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (R_a) หลังการดึงท่อ จะทำการวัดในแนวเส้นรอบวง ซึ่งเป็นแนวตั้งฉากกับทิศทางการขึ้นรูป จะทำให้ได้รายละเอียดของผิวโดยรวมได้ดีกว่า โดย

เฉพาะหากเกิดการขูดขีดบริเวณผิวท่อ และจะทำการวัดทั้งผิวด้านนอกและด้านในของท่อก่อนและหลังดึง โดยผลการวัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของผิวในและผิวนอกท่อแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



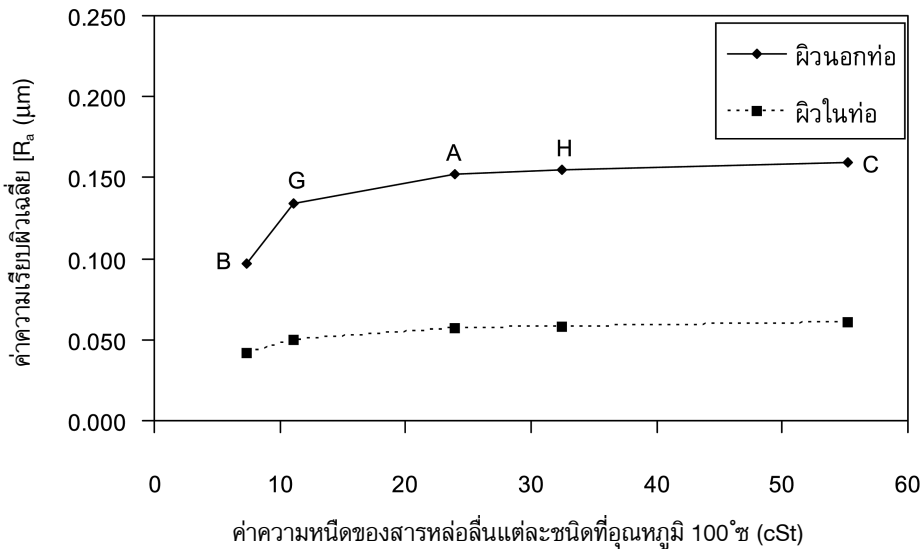
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความเรียบผิวของผิวในท่อ



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความเรียบผิวของผิวนอกท่อ

จากรูปที่ 9 และ 10 จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าความเรียบผิวทั้งด้านในและด้านนอกท่อเหมือนกัน นั่นคือผิวของท่อเรียบขึ้นกว่าท่อที่ยังไม่ได้ผ่านการดึงอย่างเห็นได้ชัด และจะเห็นได้ว่าค่าความเรียบผิวที่วัดได้สอดคล้องกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่น เพื่อให้เห็นแนวโน้มชัดเจนขึ้น รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวของท่อ ทั้งด้านในและด้านนอกกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่น โดยจากกราฟดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อความหนืด

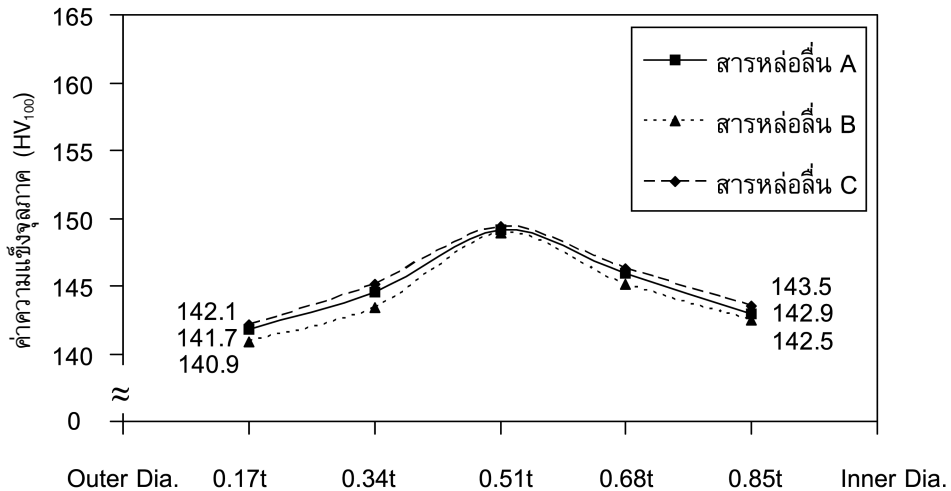
ของสารหล่อลื่นที่ใช้ลดลง จะทำให้ท่อที่ได้มีผิวเรียบขึ้น โดยสารหล่อลื่น B ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำสุด (ที่สามารถขึ้นรูปได้โดยท่อไม่ขาด) จะทำให้ได้ท่อที่มีผิวเรียบที่สุดซึ่งเมื่อค่าความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าน้อยฟิล์มของสารหล่อลื่นจะมีความหนาน้อยเช่นกัน [4, 15] จึงทำให้เกิดกลไกการถ่ายผิวจากแม่พิมพ์มาสู่ชิ้นงานผ่านสารหล่อลื่นได้ดีกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่น



รูปที่ 11 อิทธิพลความหนืดของสารหล่อลื่นที่มีต่อค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของท่อ

นอกจากนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบความเรียบผิวระหว่างผิวนอกท่อและผิวในท่อพบว่า ผิวในท่อมีความเรียบมากกว่าผิวนอกท่อ ทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการถ่ายผิวด้านในของท่อจะเกิดขึ้นได้มากกว่าด้านนอก ซึ่งสามารถเห็นได้จากผลการวัดค่าความแข็งบริเวณหน้าตัดของผนังท่อดังรูปที่ 12 โดยผิวด้านในของท่อจะมีค่าความแข็ง

มากกว่าผิวนอก หรือเกิดการเปลี่ยนรูปมากกว่านั่นเอง และผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoshida K. และคณะ [16] ซึ่งได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การมีดิ่งขึ้นรูปท่อ และพบว่าค่าความเครียดประสิทธิผล (Effective strain) ของผิวด้านในมีค่ามากกว่าผิวด้านนอก ทำให้ผิวด้านในมีความเรียบมากกว่าด้านนอก



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความแข็งบริเวณพื้นที่หน้าตัดท่อ

5. สรุปผลการวิจัย

1. ค่าความหนืด (ที่อุณหภูมิ 40 °ซ) ที่เหมาะสมที่สามารถช่วยลดแรงเสียดทานในการดึงท่อทองแดงได้ มีค่าระหว่าง 10 - 100 cSt โดยสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น
2. การเติมสารรับแรงกด (EP) ในที่นี้คือกำมะถันและฟอสฟอรัสจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่าการเปลี่ยนค่าความหนืดของสารหล่อลื่น
3. สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดน้อยจะทำให้ได้ท่อที่มีผิวเรียบ แต่ต้องไม่น้อยเกินไปจนอาจทำให้ท่อขึ้นรูปไม่สำเร็จ ซึ่งจากการทดลองในที่นี้หมายถึงความหนืดของสารหล่อลื่น (ที่อุณหภูมิ 100 °ซ) ต้องไม่น้อยกว่า 7.39 cSt

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณหลักในการทำวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และได้รับการสนับสนุนงบประมาณบางส่วนจากทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี นอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนวัสดุทดลองจากบริษัท Furukawa (Thailand) Public Co., Ltd. คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Sadok, L., Kusiak, J., Packo, M., and Ruminski, M., 1996, "State of Strain in the Tube Sinking Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 161-166.
2. Fisher, W.P. and Day, A.J., 1997, "A Study of Factors Controlling the Tube-Sinking Process for Polymer Materials", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 156-162.
3. Hillery, T. and McCabe, J., 1995, "Wire Drawing at Elevated Temperatures using Different Die Materials and Lubricants", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, pp. 53-57.
4. Bech, J., Bay, N., and Eriksen, M., 1999, "Entrapment and Escape of Liquid Lubricant in Metal Forming", *Journal of Wear*, Vol. 232, pp. 134-139.
5. ณีฐนันท์ มูลสระดู, พงศ์พันธ์ แก้วตาพิทย์ และ วารุณี เปรมานนท์, 2549, "การศึกษาอิทธิพลของความหนืดและปริมาณคลอรีนในน้ำมันหล่อลื่นของกระบวนการดึงท่อทองแดง", *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20*, 18-20 ตุลาคม, หน้า 1-6.

6. Edgar, C., 1966, *Fundamentals of Manufacturing Processes and Materials*, Adison-Wesley, New York, pp. 411-425.
7. Lange, K., 1985, *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, New York, pp. 13.1-14.23.
8. *Standard Test Method for Determination of Additive Elements in Lubricating Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry*, ASTM D 4951, 2002.
9. *Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy*, ASTM D 4294, 2003.
10. *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, ASTM G99-95, 1997.
11. Bhushun, B., 2001, *Modern Tribology Handbook*, CA:CRC Press, London, pp. 122-123.
12. วีระศักดิ์ กรัยวิเชียร, 2544, *น้ำมันหล่อลื่น*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 1-7.
13. ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ชวัลชัย สันทิพย์สมบุญ และปานเพชร ชินินทร, 2547, *เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น*, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), หน้า 243.
14. วารุณี เปรมานนท์, 2547, “พฤติกรรมด้านไทรโบโลยีของผิวสัมผัสระหว่างเหล็กทำพิมพ์และเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการจำลองการทำงานบนเครื่องแบบ Ball-on-disk”, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18*, 18-20 ตุลาคม, หน้า 1-5.
15. Dieter, G.E., 1988, *Mechanical Metallurgy*, Mc-Graw Hill, Singapore, pp. 544-549.
16. Yoshida, K., Watanabe, M., and Ishikawa, H., 2001, “Drawing of Ni-Ti Shape-Memory-Alloy Fine Tubes used in Medical Tests”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 218, pp. 251-255.